

COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EN FRACTURA DE MORTEROS DE CEMENTO REFORZADOS CON FIBRA DE VIDRIO (GRC) EXPUESTOS A LA INTEMPERIE Y CONSERVADOS EN LABORATORIO

A. Enfedaque^{1*}, J. C. Gálvez¹

¹Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. c/ Profesor Aranguren, s/n, 28040, Madrid, España.
E-mail*: alejandro.enfedaque@upm.es

RESUMEN

El mortero de cemento reforzado con fibra de vidrio (GRC) es un material que tiene unas magníficas propiedades mecánicas. Aúna las propiedades en compresión de los morteros de cemento con una resistencia a tracción y ductilidad mejoradas por la aportación de las fibras de vidrio. Sin embargo, los usos más comunes de este material han estado restringidos a aplicaciones no estructurales debido a la pérdida de propiedades que producen los agentes atmosféricos en el mismo. En estudios anteriores se ha conseguido caracterizar el comportamiento en fractura del GRC calculándose su energía de fractura. Para comprobar la variación de ésta se ha llevado a cabo una campaña de ensayos en la que se mide la energía de fractura del material después de cinco años de exposición a la intemperie. Además, los mecanismos de fallo se analizan por medio del estudio de los mapas de deformaciones obtenidos mediante videoextensometría. Los resultados hallados permiten afirmar que después de 5 años a la intemperie el material ha aumentado su tenacidad sin modificar su modo de fallo. Esto permite plantear un estudio futuro de los mecanismos microestructurales que permiten esta mejora.

ABSTRACT

Glass fibre reinforced cement (GRC) is a material that merges the outstanding compressive strength and stiffness of cement mortar with the ductility and tensile strength provided by the glass fibres. However, the most common applications of this material have been limited to non structural elements due to the reduction of its mechanical properties caused by the environment. In previous research the fracture behaviour of GRC has been assessed and its fracture energy obtained. In order to analyse the variation of the fracture energy of the material an experimental campaign has been carried out testing GRC samples after five years of natural exposure. In addition, the damage mechanisms have been studied by means of strain maps obtained with digital image correlation. The results have shown that after five years of natural exposure GRC has increased its toughness and its fracture energy. Moreover, the analysis of the strain maps have found no remarkable differences between the damage mechanisms of GRC subjected to natural exposure and GRC subjected to laboratory environmental conditions. The latter allows a future study of the micromechanism that provided such improvement.

PALABRAS CLAVE: GRC, mortero de cemento, fibra de vidrio, energía de fractura, envejecimiento.

1. INTRODUCCIÓN

El mortero de cemento reforzado con fibras cortas de vidrio (GRC) aúna las propiedades de dos materiales con comportamiento mecánico totalmente diferente. El mortero de cemento confina las fibras de vidrio dentro de una matriz cementícea aportando resistencia a compresión mientras que las fibras de vidrio mejoran la ductilidad del mortero de cemento y su resistencia a tracción. Esta mejora de las propiedades se consigue mediante la adición de un 5% de fibras de vidrio [1, 2]. Las buenas propiedades mecánicas del material han permitido que haya sido usado durante los últimos 40 años en numerosas aplicaciones como enconfrados perdidos, paneles de cerramiento de fachadas o en barreras acústicas [3].

Hasta el día de hoy prácticamente todas las aplicaciones en las que se ha utilizado este material se han limitado a aprovechar sus propiedades en usos no estructurales. Esto se ha debido a que el buen comportamiento mecánico a edades tempranas empeora con el tiempo en un proceso que ha sido denominado por algunos autores como *static fatigue* [3]. Este parece estar causado por la exposición continuada a los agentes atmosféricos. Como consecuencia de este proceso se reduce tanto la ductilidad como la resistencia a tracción [5-8].

En diversos trabajos anteriores se ha intentado reducir la variación de las propiedades mecánicas mediante la modificación de la composición de la matriz cementícea [9-10]. Se ha evaluado la influencia de compuestos como el humo de sílice, metacaolín, cenizas volantes y resinas acrílicas en las propiedades del material tanto a

corto como a largo plazo [11-12]. A pesar de todos estos esfuerzos no existe unanimidad en cuanto al efecto de dichas adiciones químicas.

La disparidad de formulaciones y métodos de ensayos empleados complica la comparación directa de resultados entre diferentes autores. En el entorno europeo la evaluación de las propiedades mecánicas del GRC sigue la norma EN 1170-5 [13]. Sin embargo, el procedimiento de ensayo que establece dicha norma proporciona datos sobre las características del material que permiten realizar comparaciones cualitativas entre diferentes formulaciones pero no caracteriza el material de manera objetiva.

En trabajos anteriores [14] se ha conseguido poner a punto un procedimiento de ensayo que proporciona la energía de fractura y que ha servido para caracterizar las propiedades mecánicas del material. No obstante la cuestión de la variación de propiedades con el paso del tiempo a la intemperie sigue sin estar resuelta.

En este estudio se comparan las propiedades mecánicas de GRC conservado en condiciones de laboratorio y sometido a la exposición de los agentes atmosféricos durante cinco años. Esta comparación se hace en función de la energía de fractura. Además, mediante un análisis de los campos de deformaciones obtenidos con videextensometría se han hallado los mecanismos de fractura.

2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

La Tabla 1 muestra la dosificación del mortero empleado, que es la habitual en la fabricación de esos materiales. Se ha empleado fibra de vidrio de tipo AR (resistentes a los álcalis) añadida en una fracción volumétrica del 5%. La longitud de las fibras fue de 3.81cm (1.5 pulgadas).

Tabla 1. Dosificación GRC.

Cemento	Arena	Agua	plastificante	Fibra vidrio
50 Kg	50 Kg	17 l	0.5 l	5%

Con estos materiales se fabricaron planchas de 1200x1200x10 mm³ mediante el método de proyección conjunta. Este método se basa en la unión de la fibra de vidrio y el mortero de cemento en el mismo molde de la pieza a hormigonar puesto que son proyectados simultáneamente pero sin existir contacto previo. El espesor de la planchas no varía puesto que en todos los usos que se dan al material se aprovecha su ligereza, proporcionada por su reducido espesor. El espesor nominal con el que se trabaja es de 10 mm. Sin embargo, el proceso de fabricación incluye el acabado de la cara que queda al aire durante la fabricación mediante un enrasado con llana lo que hace que el espesor real de la plancha tenga ligeras variaciones. De

las planchas se eliminó el contorno exterior formando un marco de 5 cm de ancho para evitar la influencia de las fibras dobladas en el borde del molde

Después de endurecidas las planchas fueron desencofradas y conservadas a 20°C y 95% de humedad en una cámara climática hasta cumplir los 28 días. Posteriormente se llevó a cabo el corte de las probetas después del cual unas han sido conservadas en condiciones de laboratorio (30% humedad relativa, 20°C) hasta el momento del ensayo mientras que otras han estado sometidas a los agentes atmosféricos durante cinco años. En las Figuras 1 y 2 se puede ver la evolución de temperatura media, humedad relativa media y pluviometría a los que estuvo sometido el material durante los cinco años de exposición.

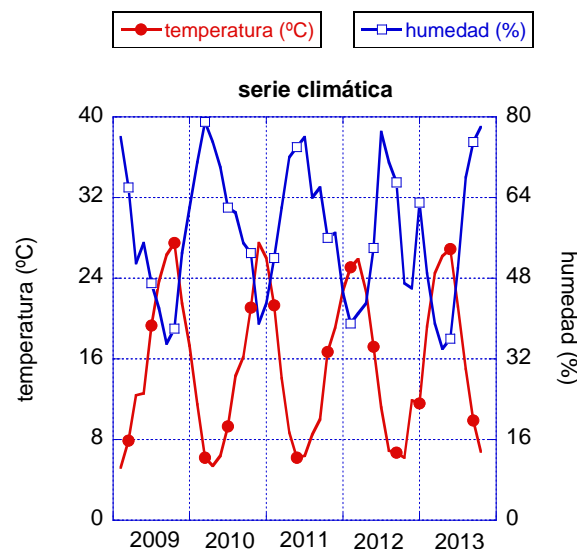


Figura 1. Exposición ambiental en la serie de cinco años.

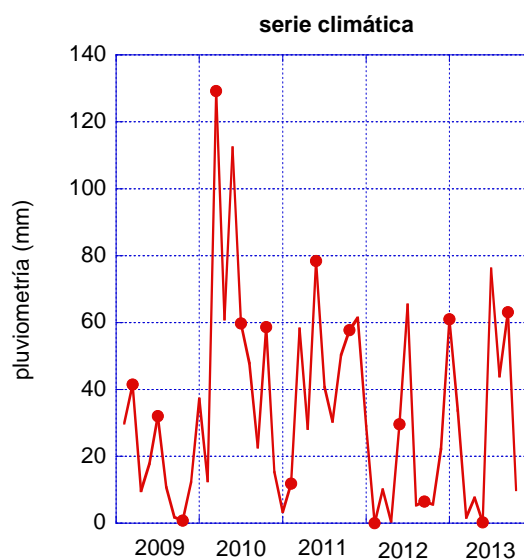


Figura 2. Pluviometría en la serie de cinco años.

Antes de realizar los ensayos las probetas fueron rectificadas para alcanzar el mismo espesor en todas ellas.

2.2 Esquema del ensayo

El esquema del ensayo fue el empleado en estudios anteriores, definido en la referencia [14]. Las dimensiones de las probetas fueron de $172 \times 55 \text{ mm}^2$. Se fijó una luz entre apoyos de $3B$, siendo B el ancho de la probeta. En estas probetas se efectuó una entalla de profundidad $D/3$ en la mitad de la probeta, siendo D el espesor de la misma. Se mecanizaron las entallas con una fresa que permitió realizar entallas de gran precisión con un espesor de 1 mm y una profundidad de $3,3 \text{ mm}$ aproximadamente. En la Figura 3 se puede ver un esquema de la probeta entallada. La superficie lateral de la probeta fue pintada de negro y posteriormente se realizó un patron de puntos blancos para poder usar los sistemas de videoextensometría.

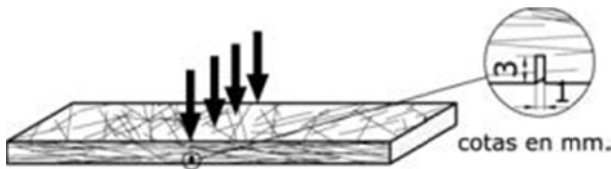


Figura 3. Probeta GRC entallada. Escala en cm en la imagen superior

La instrumentación del ensayo y el sistema de grabación para llevar a cabo el análisis de videoextensometría de correlación digital de imágenes (DIC) fue descrito en estudios anteriores [14, 15]. Una imagen del ensayo se puede ver en la Figura 4.

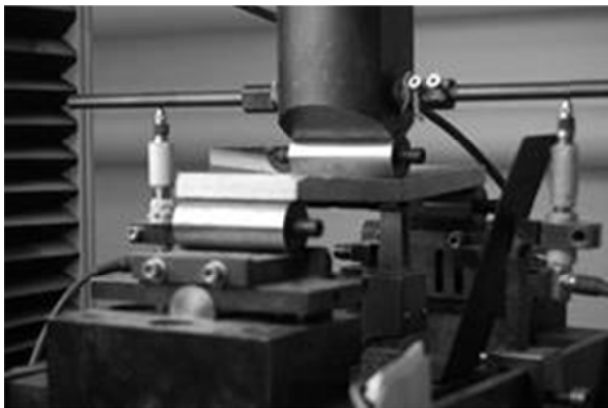


Figura 4. Disposición del ensayo desde el punto de vista de la cámara

3. RESULTADOS

En las Figuras 5 y 6 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de fractura de GRC. Se puede observar una baja dispersión en los resultados de los ensayos: curvas carga-CMOD y curvas carga-flexión del punto de aplicación de carga. En todas ellas se

alcanzan cargas superiores a 120 N . En el momento final del ensayo la apertura de fisura fue de alrededor de 2 mm , que correspondía a unos 7 mm de flecha. Los procesos de descarga tras carga máxima fueron análogos y en todos ellos la rama de ablandamiento se asemeja a la forma exponencial típica de los hormigones sin fibras.

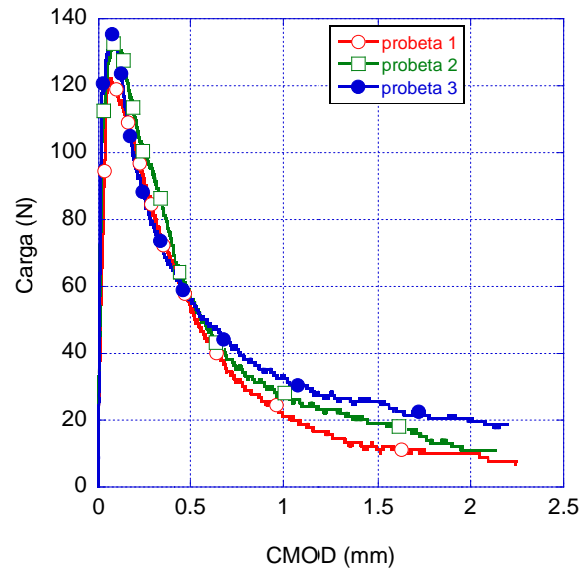


Figura 5. Curvas carga-CMOD de probetas de GRC

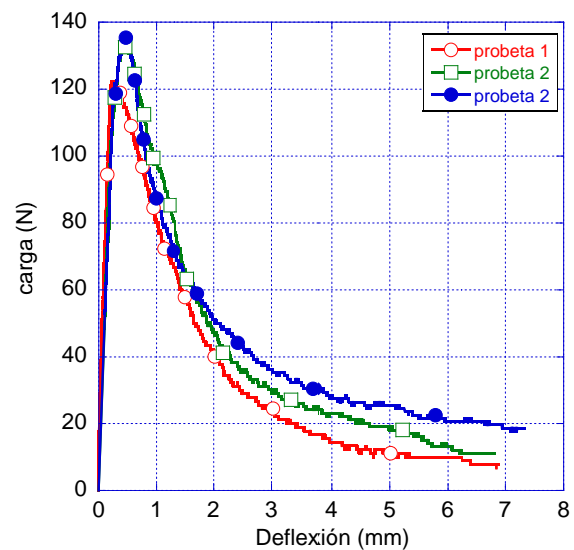


Figura 6. Curvas carga-deflexión de probetas de GRC

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En las Figuras 7 y 8 se puede ver el comportamiento medio del GRC expuesto a la intemperie y del GRC conservado en condiciones de laboratorio. Estos resultados se han obtenido en un estudio anterior [14]. La forma de las curvas obtenidas es análoga, manteniéndose la carga pico así como la forma exponencial de la rama de descarga. Sin embargo, es llamativo cómo la rama de descarga de las probetas

expuestas a la intemperie no muestran una fragilización con el paso del tiempo si no que su comportamiento es más tenaz. Esto se puede comprobar fácilmente puesto que para aperturas de fisura y flechas iguales la carga que soporta el GRC expuesto a la intemperie es mayor.

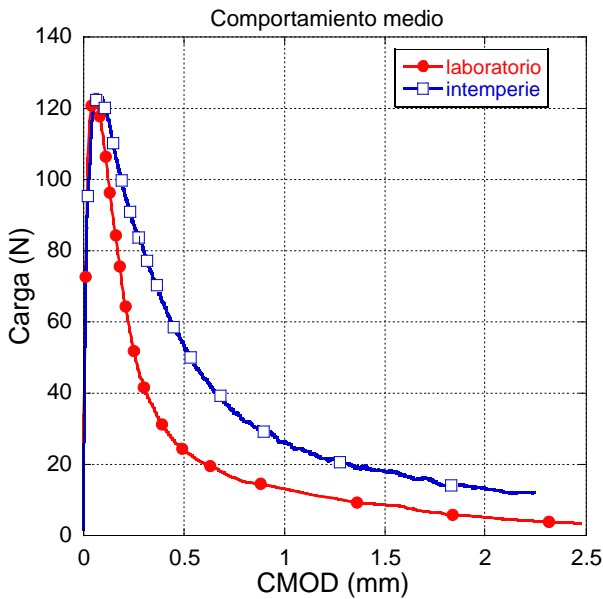


Figura 7. Curvas medias carga-CMOD de GRC en condiciones de laboratorio y a la intemperie.

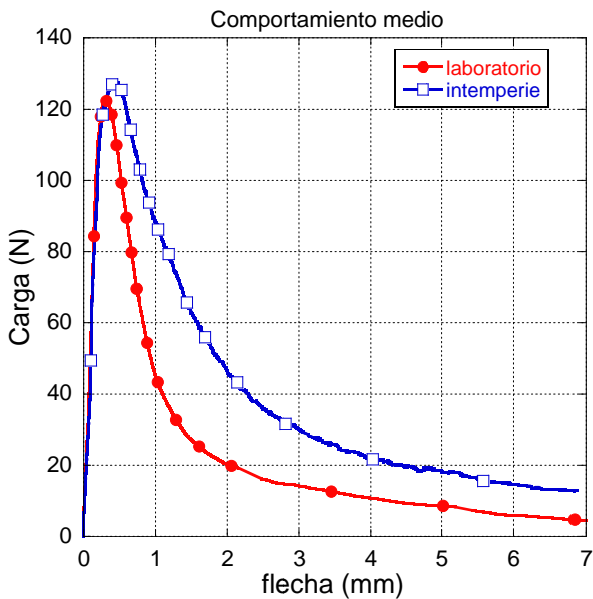


Figura 8. Curvas medias carga-flecha de GRC en condiciones de laboratorio y a la intemperie

Para realizar una comparación objetiva de los resultados se ha calculado la energía de fractura en el material después de los dos tipos de exposición según la expresión (1):

$$G_f = \frac{W_f}{\Omega} = \frac{\int_{\delta_0}^{\delta_f} F d\delta}{\Omega} \quad (1)$$

Donde W_f es el trabajo realizado para fracturar el material, Ω es el área de fractura creada, F es la fuerza, y δ es la flecha. Los resultados que se pueden ver en la Tabla 2 muestran que a pesar de los estudios anteriores donde se produce una fragilización del material con el paso del tiempo mediante métodos de envejecimiento acelerado, en el caso estudiado el GRC expuesto a la intemperie durante 5 años este fenómeno no se produce. Incluso se puede constatar que la energía de fractura del material aumenta con la exposición a los agentes atmosféricos alrededor de un 38% manteniéndose asimismo la carga máxima.

Tabla 2. Energía de fractura del GRC sometido a los dos ambientes.

	Laboratorio	Intemperie
W_f (Nmm)	135	187
G_f (N/m)	409	566

La diferencia en comportamiento fue estudiada a través de los campos de deformaciones mediante un sistema de videoextensometría. Mediante este sistema se han obtenido los campos de deformaciones que se pueden ver en la Figura 9.

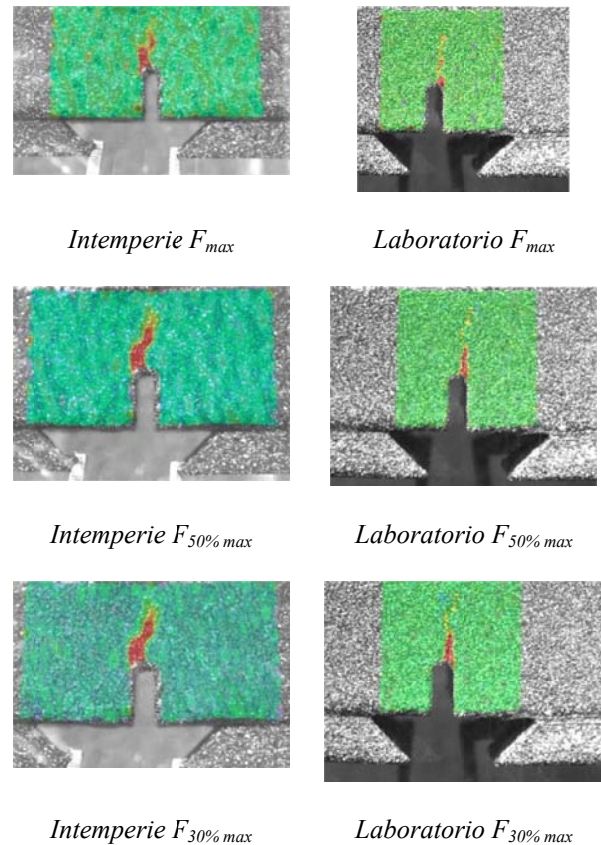


Figura 9. Campos de deformaciones en diferentes momentos de los ensayos.

En esta figura se puede ver que los campos de deformaciones del material después de haber estado sometido a ambos ambientes son comparables cuando se alcanza la carga máxima produciéndose una concentración de tensiones en la punta de la entalla.

Asimismo se puede ver que al alcanzarse el 50% de la carga máxima del ensayo en la rama de descarga se ha desarrollado aún más la concentración de tensiones ampliándose la zona dañada. En esta zona en la que se concentra el daño se ha desarrollado una fisura. También se puede apreciar como en las últimas imágenes que corresponden al instante donde se alcanzó el 30% de la F_{max} en la rama de descarga la zona dañada se ha ido extendiendo en ambos casos. Es de especial relevancia resaltar que las diferencias en el comportamiento no están siendo causadas por diferentes patrones de daño ni por aparición de un proceso de multifisuración que reparta las tensiones en un área mayor del material.

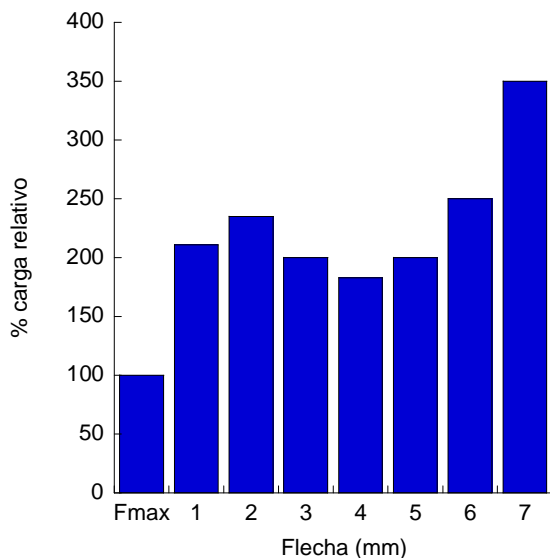


Figura 10. Carga resistida por GRC a la intemperie con respecto a GRC en condiciones de laboratorio para distintos valores de flecha.

En la Figura 10 se puede observar como el GRC que ha estado expuesto a los agentes atmosféricos no solo no ha mantenido la capacidad de carga con respecto al GRC conservado en condiciones de laboratorio si no que la ha mejorado. Analizando esta figura también se puede observar como la variación de propiedades que se ha producido no ha modificado las propiedades de la matriz de cemento puesto que el punto de carga máxima es igual en ambas situaciones. Sin embargo, la ductilidad y la capacidad de carga aportadas por las fibras mejora al estar el GRC expuesto a la intemperie.

5. CONCLUSIONES

En este estudio se ha evaluado el cambio de propiedades que se producen en el GRC debido a la exposición a los agentes atmosféricos durante 5 años. Esta evaluación se ha realizado mediante el cálculo de la energía de fractura de probetas de GRC a partir de ensayos en los que las fibras se disponen en sentido perpendicular a la carga.

Los resultados obtenidos han mostrado que el GRC expuesto a la intemperie no solo no sufre una reducción de propiedades si no que aumenta su capacidad de absorción de energía.

Mediante el análisis de los mecanismos de fallo observados por videoextensometría se ha comprobado que no se producen fenómenos de multifisuración y que por lo tanto no es este mecanismo el responsable de la variación de propiedades.

Los cambios de propiedades producidos sugieren variaciones en las intercaras fibra-matriz los cuales deben ser estudiados en mayor profundidad. También se constata que la resistencia a tracción del mortero no ha visto modificada su resistencia a tracción.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la al Ministerio de Economía y Competitividad la concesión del proyecto DPI2011-24876.

REFERENCIAS

- [1] L. Sánchez Paradelo, V. Sánchez-Gálvez, Comportamiento a tracción de cementos reforzados con fibras de vidrio. *Informes de la construcción*; **43**,77–89. 1991
- [2] L. Sánchez Paradelo, V. Sánchez-Gálvez, Los cementos reforzados con fibras de vidrio. *Hormigón y Acero*, **173**, 113–126. 1989
- [3] P. Purnell, N.R. Short, C.L. Page, A static fatigue model for the durability of glass fiber reinforced cement, *Journal of Materials Science*, **36**, 5385–5390. 2001
- [4] G.B. Kim, K. Pilakoutas, P. Waldron, Development of thin FRP reinforced GFRC permanent formwork systems. *Construction and Building Materials*, **22**(11), 2250–2259, 2008
- [5] B. Mobasher, S.P. Shah, Test Parameters for Evaluating Toughness of Glass Fiber Reinforced Concrete Panels, *ACI Materials Journal*, **86**,448–458, 1989
- [6] S.P. Shah, D. Ludirdja, J.I. Daniel, B. Mobasher, Toughness-durability of glass fiber reinforced concrete systems, *ACI Materials Journal*, **85**, 352– 360, 1988
- [7] A.J. Majumdar Fiber reinforced cement and concrete, The Construction press, 1975.
- [8] A.J. Majumdar, V. Laws, Glass fibre reinforced cement. BSP Professional Books, 1991.
- [9] S. Marikunte, C. Aldea, S.P. Shah, Durability of glass fiber reinforced cement composites, Effect of silica fume and metakaolin, *Advanced Cement Based Materials*, **5**(3–4),100–8, 1997
- [10] P. Purnell, N.R. Short, C.L. Page, A.J. Majumdar, P.L. Walton, Durability of grc made with new cementitious matrices, *GRC Proceedings*,1998
- [11] Y. Zhang, W. Sun, L. Shang, G. Pan. The effect of high content of fly ash on the properties of glass fiber reinforced cementitious composites.

- Cement and Concrete Research*, **27(12)**, 1885-91, 1997
- [12] H. Ball, M. Wackers, Long term durability of naturally aged gfrc mixes containing fortan polymer, GRC Proceedings, 2001
- [13] UNE-EN 1170-5. Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio, 1998
- [14] A. Enfedaque, J.C. Gálvez, F. Suárez, Analysis of fracture tests of glass fibre reinforced cement (GRC) using digital image correlation, *Construction and Building Materials*, **75(30)**, 472-487, 2015
- [15] A. Enfedaque, J.C. Gálvez, Energía de fractura de morteros reforzados con fibras de vidrio (GRC), *Anales de mecánica de la Fractura XXX*, 85-90, 2013